

施工期盾构隧道上浮机理与控制对策分析

叶 飞^{1,2}, 朱合华¹, 丁文其¹, 杨宏伟¹

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕安 西安 710064)

摘要: 从盾构隧道上覆土的最小厚度计算入手, 提出因注浆浆液或泥浆、水等液体包裹管片而形成的静态浮力通常不足以使隧道上浮; 在分析注浆压力分布模式的基础上, 将注浆压力可能产生的动态上浮力与浆液环产生的静态浮力进行了比较, 认为因注浆压力产生的动态上浮力是盾构隧道施工中产生上浮的主要原因, 进而提出了控制盾构隧道管片上浮的最小上覆土厚度及最大注浆压力计算式, 验算结果与实际情况吻合; 最后, 基于对管片上浮机理的分析, 对管片上浮控制提出了一些建议, 并提出为防止管片上浮, 需依据埋深、周围土体特性、注浆孔在管片环上的位置情况等对注浆压力实施动态控制。

关键词: 盾构隧道; 施工; 上浮; 注浆; 管片

中图分类号: TU 94⁺2

文献标识码: A

文章编号: 0253 - 374X(2008)06 - 0738 - 06

Analysis and Control of Upward Moving of Shield Tunnel Under Construction

YE Fei^{1,2}, ZHU Hehua¹, DING Wenqi¹, YANG Hongwei¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shaanxi Provincial Major Laboratory for Highway Bridge & Tunnel, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on the calculation for the least depth of the overburden, the buoyancy caused by grouts, slurry or water enwrapping around the tunnel segments is not considered to be big enough to induce the upward moving of the shield tunnel. Then, two kinds of buoyancies caused by grouts and grouting pressure respectively are compared in terms of the distribution models of the grouts. Results show that the buoyancy caused by grouting pressure is the dominating factor to bring about segments upward moving; thus the formula for the calculation of the least depth of the overburden and the maximal grouting pressure is deduced, which proves to be accordant with the actual situation. Finally, some proposals for controlling the upward moving of shield tunnel are put forward on the basis of the analysis of the moving reasons. The dynamic control for grouting pressure is recommended to be carried out according to the overburden, soil properties and the location of the grouting holes on segment rings.

Key words: shield tunnel; construction; upward moving; grouting; tunnel segments

收稿日期: 2006 - 10 - 11

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2006AA11Z102)

作者简介: 叶 飞(1977 →), 男, 博士生, 主要研究方向为隧道工程和技术, E-mail: xianyefei@sohu.com;

朱合华(1962 →), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土与地下工程, E-mail: zhuhehua@mail.tongji.edu.cn

盾构隧道在穿越江河底浅覆土时,上浮问题尤为突出,已经引起一定关注.沈征难从地质条件、衬背注浆、盾构姿态入手,对盾构掘进过程中管片上浮的原因进行了分析研究,提出了控制措施^[1];张庆贺等从盾构开挖面平衡状态及隧道水底抗浮平衡条件着手,推导了土压平衡盾构开挖工作面水土压力与密封舱内压力动态平衡式,得到了盾构穿越水底浅覆土保持土体及隧道稳定所需的最小覆土厚度^[2];黄威然等从盾构工法特性、地质条件、盾构姿态、衬背注浆和设计等 5 个方面,对施工阶段的盾构隧道漂移控制提出了建议^[3].黄学军等从施工角度分析了在高压水条件下控制隧道上浮量的措施^[4];C. B. M. Blom 等在考虑浮力作用下,运用三维有限元模型对荷兰“绿心隧道(Green Hart)”进行了结构分析^[5].

从查阅文献结果来看,对管片上浮原因,通常的看法是注浆浆液或泥浆、水等液体包裹住了刚脱离盾尾的管片从而产生了向上的浮力,当该浮力超过了管片上覆土重力时,就有可能产生上浮现象;或是由于盾构施工中控制不当,产生了“蛇行”现象,从而造成管片局部向上偏位.本文着重从计算浆液产生的静态浮力及注浆压力可能产生的动态上浮力入手,分析注浆压力的分布模式,进而分析管片上浮的机理,认为注浆压力是盾构隧道施工中产生管片上浮的主要原因;提出了考虑注浆压力产生的“上浮力”的抗浮计算式;并对管片上浮控制提出了一些建议.

1 盾构隧道抗浮计算

1.1 一般计算方法

一般认为,盾构隧道管片在受到的浮力(水浮力、泥浆浮力或者同步注浆的浆液浮力)大于上覆土与管片重量及其他效应产生力的总和时,管片就会产生上浮,即上浮管片主要为刚脱离盾尾的一环或数环(图 1).相应的上覆土最小控制厚度可分为:不考虑纵向连接螺栓预紧力及上覆土的粘聚力效应;考虑纵向连接螺栓预紧力效应;考虑纵向连接螺栓预紧力及上覆土的粘聚力效应等 3 种情况.

1.1.1 不考虑纵向连接螺栓及上覆土的粘聚力效应

满足抗浮要求的上覆土最小厚度计算公式如下^[2]:

$$h > \frac{R_o^2 j - (R_o^2 - R_i^2) c}{2 R_o} \quad (1)$$

式中: R_o 为管片外径; R_i 为管片内径; j 为浆液重

度(考虑水浮力时即为水的重度,考虑泥浆浮力时即为泥浆重度); h 为上覆土厚度; c 为混凝土重

为上覆土的浮重度(此处是将上覆土考虑为透水层,若为不透水层则为土的重度或饱和重度 γ_{sat} ,此时水深也作为上覆荷载作用在隧道上).

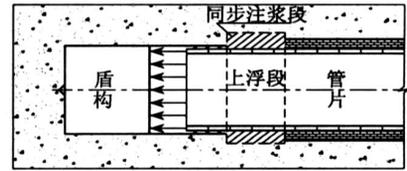


图 1 盾构施工示意图

Fig. 1 Sketch of shield tunnel construction

1.1.2 考虑纵向连接螺栓的预紧力效应

满足抗浮要求的上覆土最小厚度计算公式如下:

$$h > \frac{R_o^2 j - (R_o^2 - R_i^2) c - \sum_{i=1}^c \frac{N_i k}{B}}{2 R_o} \quad (2)$$

式中: c 为管片环间纵向螺栓的数量; N_i 为每个环间纵向螺栓施加的紧固力; k 为管片环间的摩擦系数; B 为管片环宽度.

1.1.3 考虑纵向连接螺栓预紧力及上覆土的粘聚力效应

满足抗浮要求的上覆土最小厚度计算公式如下:

$$h > \frac{R_o^2 j - (R_o^2 - R_i^2) c - \sum_{i=1}^c \frac{N_i k}{B} - F_c}{2 R_o} \quad (3)$$

式中: F_c 为因上覆土的摩擦力而产生的阻碍力,其大小可按假定滑裂面方法或者通过考虑对上覆土的压缩效应来计算.

1.2 对一般抗浮计算方法的讨论

1.2.1 几个工程实例的抗浮计算

式(1)是当前较常用的运用抗浮指标确定浅覆土最小厚度的计算公式^[2],式(2)和(3)是作者提出的考虑纵向连接螺栓预紧力效应和上覆土的粘聚力效应的抗浮计算式.容易看出,由式(1)确定的最小厚度大于式(2)确定的最小厚度大于式(3)确定的上覆土最小厚度.下面通过几个具体工程实例分析式(1)~(3)的合理性,工程设计、土性及其他参数如表 1 所示.

对工程一:运用式(1)求得满足抗浮要求的最小

上覆土厚度为 5.49 m;运用式(2)求得的最小上覆土厚度为 5.31 m.

对工程二:运用式(1)求得满足抗浮要求的最小上覆土厚度为 4.03 m;运用式(2)求得的最小上覆

土厚度为 3.82 m.

对工程三:运用式(1)求得满足抗浮要求的最小上覆土厚度为 2.07 m;运用式(2)求得的最小上覆土厚度为 1.94 m.

表1 工程设计、土性及其他参数

Tab.1 Design, soil properties and other parameters

工程实例	R_0/m	R_j/m	$\gamma/(N \cdot m^{-3})$	$\gamma'/(N \cdot m^{-3})$	$\rho/(N \cdot m^{-3})$	N_i/N	$c/\text{根}$	k	B/m
工程一	7.25	6.65	12 500	25 000	17 700	2 000	38	0.6	1
工程二	5.50	5.00	12 500	25 000	17 500	2 000	34	0.6	1
工程三	3.00	2.70	12 500	24 000	18 000	1 500	16	0.6	1

1.2.2 对计算结果的讨论

1.2.1 中对3种直径的盾构管片,分别运用式(1),(2)进行了验算.从结果可以看出,该两式要求的满足抗浮最小覆盖层厚度远小于管片的外径,运用式(3)求得的上覆土厚度值会更小.换言之,满足抗浮要求的最小覆盖层厚度是很容易满足的.这与工程实际不符,因为一些盾构隧道施工(包括大断面盾构和中小断面盾构)中,在上覆土厚度接近于1倍盾构直径的情况下,仍然出现了管片上浮现象.

经分析可知,式(1),(2),(3)等抗浮计算式是基于图2所示的计算模型推理而来,即假设刚脱离盾尾的管片环(1环或数环)在注浆浆液浮力作用下,出现了整体错位.该模型的前提是假设受浮力段管片在液态浆液的包裹之下(图3,4),其上浮力由下式求得

$$F_{float} = R_0^2 j \quad (4)$$

这是一种较为理想的情况,只有在土质较好的硬质土中可能会出现.因为在一般情况下,管片脱离盾尾后,在管片自重、上覆土自重,以及侧压力作用下,管片周围的全部或部分土体会马上与管片靠拢,根本行不成完整的浆液环,即不满足图3和4所示之情况.

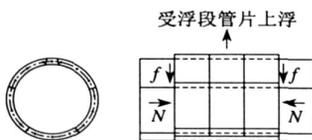


图2 受浮段管片错位上浮分析模型

Fig.2 Analysis model of segments upward moving

而且,管片注浆过程中,后续注浆孔注浆时,前面已注过浆的注浆孔附近的浆液可能已经初凝(尤其当采用初凝时间较短的双液瞬凝浆液时),这样就不会在建筑间隙中形成完整浆液环.

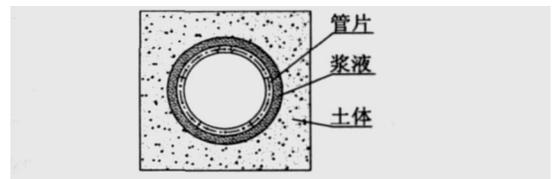


图3 管片被浆液包裹示意图

Fig.3 Segments wrapped by grouts

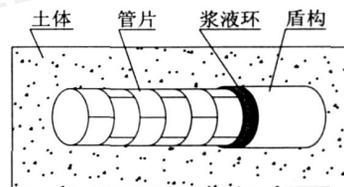


图4 理想状态下的浆液环

Fig.4 Ideal grouts ring

2 盾构隧道上浮机理分析

一般情况下,运用式(4)计算得到的“上浮力”不足以引起隧道上浮.本文认为,造成盾构隧道施工中管片局部上浮错台的真正原因是注浆压力.

2.1 建筑间隙的形式

依据盾构工法的特性:开挖直径 $D >$ 盾壳外径 $D_0 >$ 管片外径 d ,于是,在管片与土体间形成了暂时的建筑间隙 $= D - d^{[3]}$.管片脱离盾尾后,一般情况下,对于上方及两侧土体,在自身重力作用下,会向管片靠拢以至消除该间隙.管片纵向上一定长度范围相当于一两端固定的梁,一端受到盾尾的约束,另一端受到已凝固浆液固体的约束,由于管片具有纵向抗弯刚度,所以,在管片下部,该建筑间隙在一定范围内存在,形成如图5所示的建筑间隙形式.

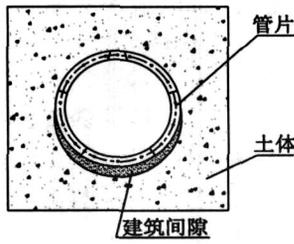


图 5 建筑间隙形式

Fig. 5 Shape of construction gap

另一种可能是,管片脱离盾尾后,建筑间隙马上被周围土体填充,造成事实上已不存在建筑间隙.此外,正如前文中提到,在土质较好的硬质土中,管片脱离盾尾后,其建筑间隙可能在一定时间内完整存在.

当对盾构隧道实施壁后注浆施工时,对应不同形式的建筑间隙,也就形成了不同的注浆压力分布形式.

2.2 注浆压力的分布形式

2.2.1 局部分布

(1) 三角形分布.当建筑间隙已被周围土体填充时,注浆浆液会在该填充土体中发生渗透扩散.

注浆浆液在土体中的渗透和运动与众多因素有关,带有相当大的随机性,因而注浆对管片和土体产生的荷载分布形式很难精确给出.一般作法是假设单孔注浆压力对称分布,成等腰三角形形式作用于注浆孔的周围^[6],如图 6 所示.

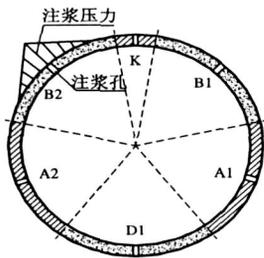


图 6 注浆压力三角形分布

Fig. 6 Triangular distribution of grouting pressure

(2) 扇环形分布.依据本文 2.1 中分析,若建筑间隙满足图 5 所示的形式,则在管片环上部(图 6 中的 B1 和 B2),浆液直接通过土体间隙注入土体,压力逐步消减,可以将其假设为如图 6 所示的三角形分布.

而在管片环下部建筑空隙存在区域,注浆浆液需先填满建筑空隙,然后再注入周围土体,此时的注浆压力则在建筑间隙范围内均匀分布,形成如图 7 所示的注浆压力,其作用范围受土质及施工情况影响.

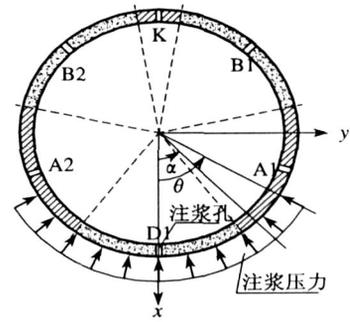


图 7 注浆压力扇环形分布

Fig. 7 Annular and sector distribution of grouting pressure

2.2.2 整环分布

在硬质土(管片脱离盾尾后,其建筑间隙可能不会立即被周围土体填充,从而形成整环建筑间隙)和空隙率较大、渗透性较好的砂性土中,注浆时浆液能够形成如图 3,4 所示浆液环,此时的注浆压力在整个管片环上的分布可假设为如图 8 和 9 所示的整环均匀分布和整环非均匀分布.



图 8 注浆压力整环均匀分布

Fig. 8 Uniform annular distribution of grouting pressure

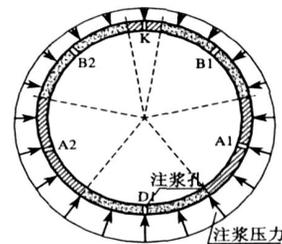


图 9 注浆压力整环非均匀分布

Fig. 9 Uneven annular distribution of grouting pressure

2.3 注浆压力产生的“上浮力”

当注浆压力在管片下部集聚时(如图 7 所示),可以形成较大的集中力或分布力,即所谓的“上浮力”,当此力超过上覆土荷载和管片重力荷载之和时,就可能引起隧道上浮.

以图7所示的扇环形注浆压力分布为例,容易求得注浆压力形成的向上的合力即“上浮力”为

$$PR_0 \cos d = 2 PR_0 \sin \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

式中: P 为施工过程中所用注浆压力; α 为注浆浆液分布区域边界与竖向的夹角(见图7). 表2将单位长度上浆液环产生的静态上浮力与不同注浆压力下由注浆压力产生的“上浮力”进行了比较.

表2 浆液环与注浆压力产生上浮力比较表

Tab.2 Comparison of the buoyancies caused by grouts ring and grouting pressure

管片外半径/m	注浆压力/MPa	上浮力/kN		
		式(4)	式(5), $\alpha=45^\circ$	式(5), $\alpha=90^\circ$
3	0.2		848	1 200
	0.4	253	1 696	2 400
	0.6		2 545	3 600
	0.8		3 393	4 800
5	0.2		1 414	2 000
	0.4	981	2 828	4 000
	0.6		4 242	6 000
	0.8		5 656	8 000
7	0.2		1 980	2 800
	0.4	1 923	3 959	5 600
	0.6		5 939	8 400
	0.8		7 918	11 200

注:浆液重度取 $\gamma_j = 12\,500 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$

由表2可以看出,依据图7所示的浆液分布模型,分别取 45° 和 90° 时(实际工程中的取值视情况而定),计算得到的注浆压力产生的上浮力均大于浆液环产生的上浮力,因此,注浆压力和管片上浮有关而且不可忽视.

3 盾构隧道施工抗浮计算

3.1 抗浮计算

3.1.1 计算模型

仍采用图2所示的分析模型,用式(5)替代式(1)(或者式(2),(3))中的上浮力,得到

$$h > \frac{2 PR_0 \sin \frac{\alpha}{2} - (R_0^2 - R_i^2) \gamma_c}{2 R_0} \quad (6)$$

若上覆土厚度一定,则可由式(6)推得最大注浆压力

$$P = \frac{2 R_0 h + (R_0^2 - R_i^2) \gamma_c}{2 R \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (7)$$

式(6),(7)中的 α 可取为 45° 或依据土质及注浆施工

情况选取其他角度,若以最不利情况考虑,可取为 90° .

3.1.2 工程实例

采用表1中工程一的相关参数,注浆压力取 0.4 MPa , 取 90° ,将各参数带入式(6),求得最小上覆土厚度为 20.05 m . 同样,在同样参数条件下,若上覆土厚度已定,则可代入式(7)求得最大注浆压力:如上覆土厚度为 15 m ,可算得可用的最大注浆压力为 0.31 MPa ,若超过此注浆压力,则有可能出现管片上浮现象.

3.2 土性对抗浮特性的影响

为分析不同土性对隧道抗浮特性的影响,本文运用同济曙光有限元分析软件,对不同土质条件下,相同上浮力对隧道结构产生的上浮量进行了弹塑性分析计算,计算中采用弹性-理想塑性本构关系,DP(Drucker-Prager)屈服准则.

计算中将该问题视为平面应变问题,取上浮力为 848 kN (表1中取 45° ,注浆压力为 0.2 MPa 时的浮力值),并取管片外直径为 6 m ,厚度 0.3 m ,覆土厚度为 12 m .左、右、下均取3倍隧道外径即 18 m 计算范围来计算,左右施加水平方向位移约束,下表面施加竖直方向位移约束,上表面为自由面.计算网格图如图10所示.

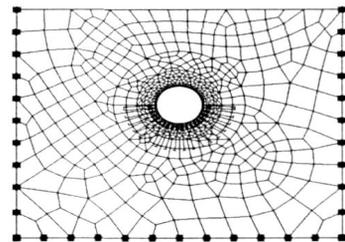


图10 计算网格图

Fig.10 Analysis model

计算分5种情况,土体弹性模量分别取 $10 \sim 50 \text{ MPa}$. 计算所用的其他参数见表3.

表3 计算所用材料参数

Tab.3 Material parameters of the calculation

材料	密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/ MPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
土体	18.7	10~50(分级)	0.38	40	20
管片	25.0	3.45×10^4	0.18		

经计算得到土体不同弹性模量条件下对应的隧道衬砌拱顶的最大上浮量,进而绘出土体弹性模量与隧道最大上浮量的关系曲线如图11所示.

由计算结果可以看出,在其他条件均相同的条件下,隧道最大上浮量随着土体弹性模量的增大而减小,即上覆土本身的特性对盾构隧道的抗浮特性有较大影响。

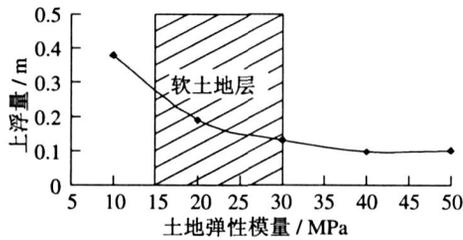


图 11 最大上浮量与土体弹性模量间关系曲线

Fig. 11 Relation curve of upward moving distance and Young's modulus

4 盾构隧道施工上浮控制探讨

4.1 改善上覆土特性

设计中尽量避免浅埋和超浅埋;加大浅埋段上覆土的厚度;改善上覆土的性能。本文 3.2 节的分析表明,在上浮力大小及上覆土厚度一定的条件下,隧道上浮量随土体弹性模量的增大而减小,因而改善土体特性可以抑止隧道上浮。

4.2 注浆压力动态控制

依据分析,认为注浆压力产生的“上浮力”是管片上浮的主要原因,所以对注浆压力的控制是管片抗浮关键。注浆压力大小采用分块分孔控制的方式:依据埋深、周围土体特性、注浆孔在管片环(或盾尾)上的位置情况等对注浆压力实施动态控制。

靠上部的注浆孔,计算注浆压力时依据上覆土特性,要使浆液不通过土体间隙流出地表或流入水中,并不造成上覆土的隆起;靠下部的注浆孔,采用的注浆压力可依据本文提出的式(7)进行抗浮计算。而且,对注浆压力产生的荷载还要进行管片结构本身安全性计算。

4.3 增加管片衬砌整体纵向抗弯刚度

通过改善浅埋段管片自身的受力性能,增加浅埋段管片的纵向螺栓数量,加大螺栓直径,设置剪力键,从而提高其抗剪性能,或者在不影响螺栓正常使用的前提下,加大螺栓紧固力,增大邻接管片对上浮段管片的约束力,从而增大管片的整体纵向抗弯刚度,改善其抗浮特性。

5 结论

(1) 由浆液环产生的浮力不是管片出现上浮现象的主要原因,造成管片上浮的主要原因是注浆压力产生的“上浮力”。

(2) 最小上覆土厚度和最大注浆压力可分别依据式(6)和(7)进行计算。隧道的抗浮特性与上覆土本身的特性关系密切。

(3) 管片的上浮控制可从增加上覆土厚度、改善上覆土性能、增加管片衬砌整体纵向抗弯刚度入手,也可通过对注浆压力的严格控制来实现。依据埋深、周围土体特性、注浆孔在管片环上的位置情况等对注浆压力实施动态控制。

参考文献:

- [1] 沈征难. 盾构掘进过程中隧道管片上浮原因分析及控制[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(6): 51.
SHEN Zhengnan. Analysis and control of the upward moving of tunnel segments in the process of shield excavation [J]. Modern Tunneling Technology, 2004, 41(6): 51.
- [2] 张庆贺, 王慎堂, 严长征, 等. 盾构隧道穿越水底浅覆土施工技术对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 857.
ZHANG Qinghe, WANG Shentang, YAN Changzheng, et al. Tunneling methods through river (lake, sea) bed under shallow covering by shield [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 857.
- [3] 黄威然, 竺维彬. 施工阶段盾构隧道漂移控制的研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(1): 71.
HUANG Weiran, ZHU Weibin. To control the displacement of a shield tunnel during construction [J]. Modern Tunneling Technology, 2005, 42(1): 71.
- [4] 黄学军, 马小汀. 高水压下泥水盾构掘进技术[J]. 隧道建设, 2004, 24(6): 39.
HUANG Xuejun, MA Xiaoting. Boring technology with slurry shield under high water pressure [J]. Tunnel Construction, 2004, 24(6): 39.
- [5] Blom C B M, van der Horst E J, Jovanovic P S. Three-dimensional structural analyses of the shield-driven “green heart” tunnel of the high-speed line south [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1999, 14(2): 217.
- [6] International Tunneling Association. Working Group 2. Guidelines for the design of shield tunnel lining [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(3): 303.